

## 平成28年熊本地震による通潤橋の 地震応答と耐震補強に関する研究

Earthquake response to the 2016 Kumamoto earthquake and retrofitting of Tsujun bridge

萩原 一帆<sup>1</sup>・伊津野 和行<sup>2</sup>

Kazuho Hagiwara and Kazuyuki Izuno

<sup>1</sup>京都大学大学院生 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)  
Master Course Student, Kyoto University, Graduate School of Engineering

<sup>2</sup>立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)  
Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Tsujun Bridge at Yamato town in Kumamoto is a cultural heritage masonry arch aqueduct bridge, which was built in 1854 to send water for agriculture. This bridge suffered damage due to the 2016 Kumamoto earthquake, and cannot send water because of leakage. This paper conducted earthquake response analysis of Tsujun bridge using FEM, and studied the strengthening method for future earthquakes. The results showed that the strengthening at the base of the water channel was effective to decrease the shear stress distribution.

**Keywords:** Kumamoto earthquake, masonry structure, earthquake response analysis, FEM

### 1. はじめに

通潤橋（図1）は熊本県上益城郡山都町にあり、国の重要文化財に指定されている石造りアーチ水路橋である。この橋は1854年に水の便の悪さを解消するために建造された日本最大級の石造りアーチ水路橋で、建造されてから熊本地震の震災前に至るまで周辺の田畑を潤す働きをしてきたと考えられており、三本の通水管から流れる放水が有名で観光名所にもなっている<sup>1)</sup>。平成28年熊本地震により、側壁がずれた程度（図2）で物理的な被害は少なく、アーチが崩れるまでには至らなかったが、漏水が激しいため水が流せなくなり、通潤橋本来の機能が損なわれてしまった。

本研究では、平成28年熊本地震で計測された地震波を用いて通潤橋の地震応答解析を行い、数値解析結果をもとに通潤橋の文化的価値が損なわれないような補強について検討した。



図1 通潤橋



図2 側壁のずれ

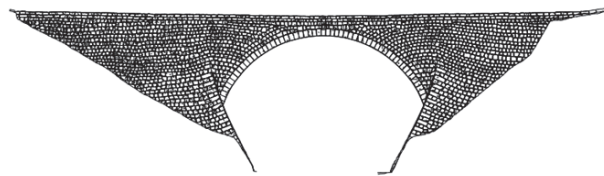
## 2. 通潤橋の解析モデル

### (1) 概説

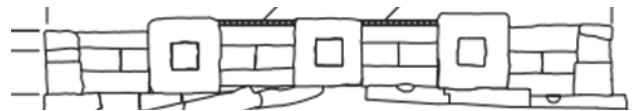
通潤橋の地震応答を検討するにあたり、構造解析ソフトはSAP2000<sup>2)</sup>を使用した。通潤橋をモデル化するにあたり、現地調査による計測結果をもとに算出した通潤橋の固有振動数（橋軸直角方向2.37Hz、鉛直方向5.27Hz）と減衰定数（0.026）を参考にした<sup>3)</sup>。また、熊本地震で通潤橋の主構造には大きな影響がなく、縁石の面外方向への移動や、石管のずれによる水もれ程度であったため、固有周期を合わせた簡単な構造モデルを作成した。その他に、通水管周辺の要素を変更させることによって通潤橋の地震応答がどのように変化するのか比較検討するために、通水管周辺の部材特性を変更させた解析モデルを複数パターン作成した。

### (2) 解析モデルの概形

解析モデルの寸法は『重要文化財 通潤橋 保存活用計画<sup>1)</sup>』に示されている図（図3）を参考とし、橋長70.6m、全幅員6.7m、高さ16m、通水管は1.4m間隔で3本作成した。構造モデルは全てソリッドで作成し、自動分割により細かく分割して要素数5257の有限要素モデルとした（図4）。橋軸直角方向をx方向、橋軸方向をy方向、鉛直方向をz方向とした。また、地面に接している全ての節点は固定した。



(a)正面図



(b)通水管周辺の断面図

図3 参考図<sup>1)</sup>

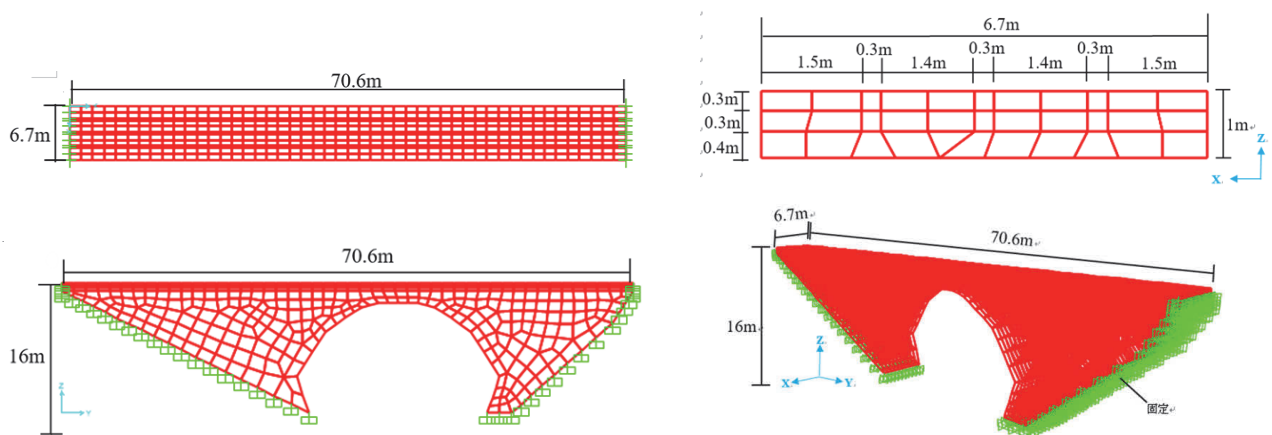


図4 解析モデルの概形

### (3) 解析ケース

解析モデルを作成するにあたり、部材特性が異なる要素を2つ使用した。一つは石材を模した要素、もう一つは盛土を模した要素であり、それぞれ要素1、要素2とする。部材特性は通潤橋の解析モデルの固有振動数が文献<sup>3)</sup>に示した通潤橋の固有振動数と近くなるように設定した。また、減衰定数はモーダル減衰としてモデルのすべてのモードに共通の値0.026（計測したデータをもとに算出した減衰定数）を与えた。

表1 部材特性

要素	ヤング係数 (GPa)	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
1	1.5	40	0.2
2	0.75	30	0.2

#### a) モデル1

解析モデルを構成する全てのソリッドを要素1で作成して、通水管にあたる部分は空洞にした解析モデル。全体的な挙動を把握するため、均一の要素のモデルとした。

#### b) モデル2

モデル1の空洞にした通水管にあたる部分を、要素1のソリッドで埋めた通水管を考慮しない解析モデル。通水管のモデル化を省略できるかどうか検討するために作成した。

#### c) モデル3

盛土部の通水管下部を要素1で固め、それより上を要素2のソリッドで埋めた、盛土部を2つの異なる部材特性で固めた解析モデル。補強のため、盛土を少なくして石材を追加した。

#### d) モデル4

盛土は後の時代に追加されたものである。よって、通水管周辺の盛土部を取り除いた、建造当初に近い状態の解析モデル。なお、その他を構成するソリッドは要素1とした。

#### e) モデル5

盛土部全体を要素2のソリッド、その他のソリッドを要素1で構成した解析モデル。現状の通潤橋に近いモデルである。

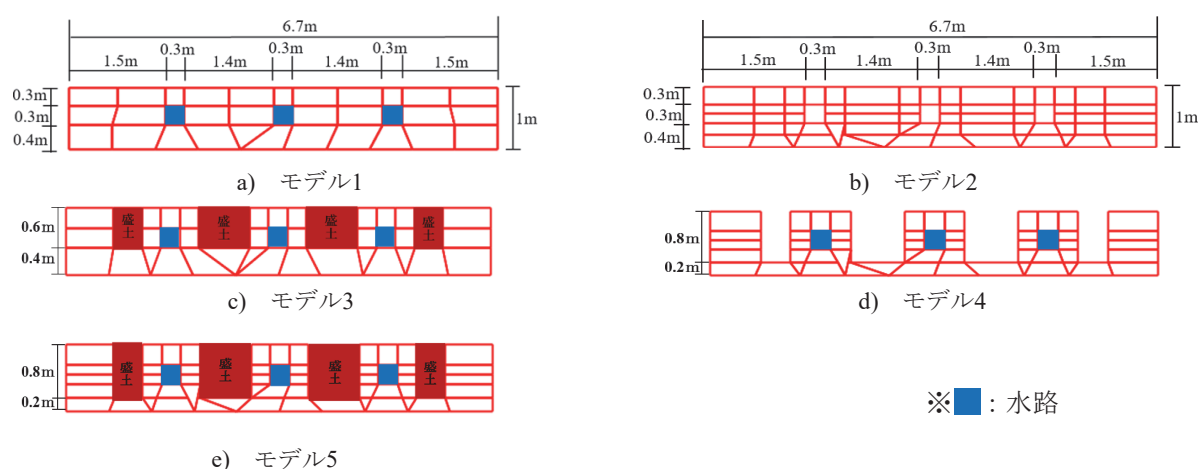


図5 解析モデル通水管周辺部の断面図

通潤橋は文化遺産構造物であるため、外観や材質を変えない補強が望ましい。また、通水路のひび割れを防ぐためには、通水路の地震応答を小さく抑えることが望ましい。よって本研究では以上5種類のモデルを考えて、地震応答を比較検討した。

#### (4) 固有値解析

モデル1~5の固有値解析をおこなった結果、橋軸・橋軸直角・鉛直方向のそれぞれのモードの有効質量比はほぼ同じ値となり、3方向の支配的なモードは同じ結果となった。これより、通潤橋周辺の盛土部の部材特性を変化させても、通潤橋の固有値にはほぼ影響がないと考えられる。また、橋軸・橋軸直角方向では支配的なモードの有効質量比が半分近くの約40%を占めているのに対し、鉛直方向の支配的なモードの有効質量比は一番大きなものでも約25%と低く、その次に続くモードも25%近くあることから、橋軸・橋軸直角方向のように卓越したモードが1つしかないのではなく複数存在していると考えられる。橋軸直角方向の支配的なモードはモード1であり、固有振動数は2.52Hz（モデル1）でたわみ1次振動を示し、鉛直方向の支配的

表2 モデル1の固有値解析結果

方向	卓越 モード	固有周期 (sec)	固有振動数 (Hz)	有効質量比 (%)
橋軸直角方向	1	0.40	2.52	40.9
橋軸方向	9	0.11	9.51	40.7
鉛直方向	3	0.20	5.01	22.3
	16	0.07	14.1	24.8

なモードであるモード3では固有振動数が5.01Hz（モデル1）でたわみ1次振動を示していることから、通潤橋の振動特性と近い振動特性を持つ解析モデルを作成することができたと云える。

各モデルの卓越モードは同じであり、各モードの振動形状は同じであった。橋軸直角方向の支配的なモードであるモード1では面外1次振動、橋軸方向の支配的なモードであるモード9ではたわみ2次振動、鉛直方向の支配的なモードであるモード3、モード16ではそれぞれ、たわみ1次振動、たわみ5次振動である。

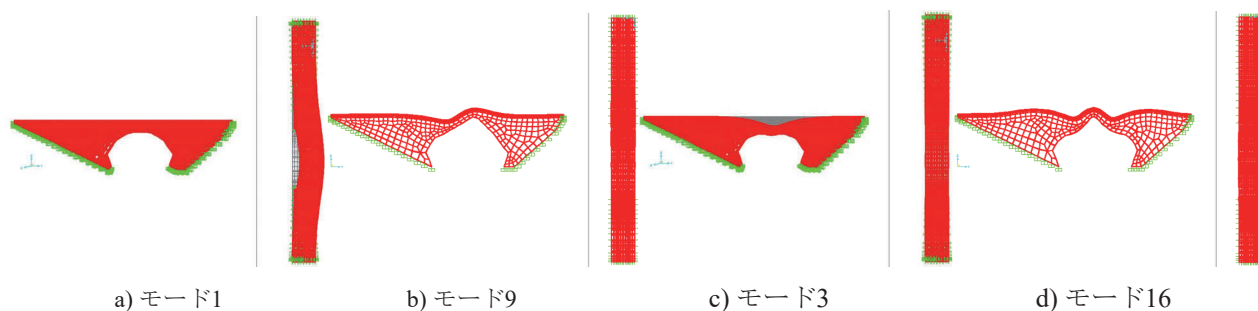


図6 卓越振動モード

### 3. 地震応答解析

作成した5つのモデルの線形地震応答を、SAP2000のモーダル時刻歴解析によって求めた。

#### (1) 入力地震波

##### a) 観測点について

入力地震波は、国立研究開発法人・防災科学技術研究所の旧矢部町にある強震観測網K-NET<sup>4)</sup>（通潤橋からおおよそ1km離れた地点）で観測された2016年4月14日21時26分に起きた前震と4月16日01時25分に起きた本震のデータを使用した。

表3 観測点情報<sup>4)</sup>

観測点名	KMM009 矢部
所在地	熊本県上益城郡山都町下馬尾 286 番地 4
位置情報	緯度 32.6858N 経度 130.9856E 標高 443m

##### b) 入力地震波形

入力地震波は観測された地震波が東西・南北・鉛直方向であったのに対し、通潤橋は南北方向より15°程西へずれているため、水平方向の地震波形は南北方向・東西方向を三角関数で合成し、通潤橋の橋軸方向・橋軸直角方向に修正した図7の波形を入力した。

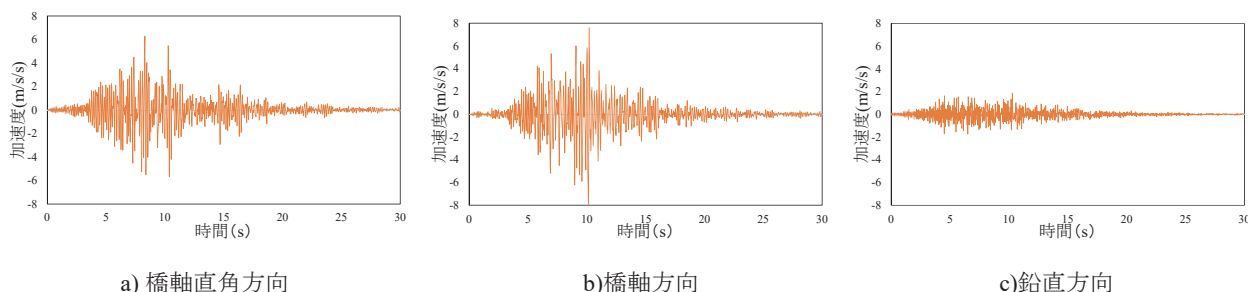


図7 2016/4/16 01:25（本震）の地震加速度波形

#### (2) 最大変位を示す節点

地震応答解析により、3方向（橋軸・橋軸直角・鉛直方向）それぞれの最大変位について検討する。対象とする節点は図8に示す通潤橋上部のJoint1~Joint20とし、これらの節点の前震と本震における時刻歴変位応答を比較した。3方向それぞれの絶対最大変位を示した節点を図9に、そのときの変形の形状を図10に、最

大変位を示した時間、変位量をまとめた表を表4に示す。

最大変位を示す節点は橋軸直角方向ではアーチ中央部であったが、橋軸方向・鉛直方向は異なり、最大変位を示す時間も3方向の前震・本震それぞれ比較しても異なっている。時間によって異なる振動モードが卓越し、単純にどこか一箇所を補強することでは、効果的な補強にならないことが推測される。

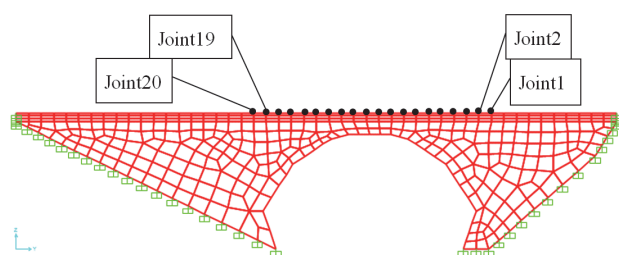


図8 時刻歴変位応答をみる節点

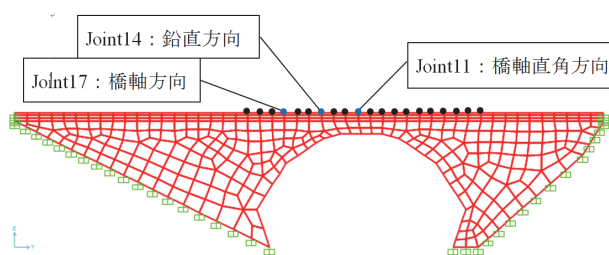


図9 最大変位を示した節点

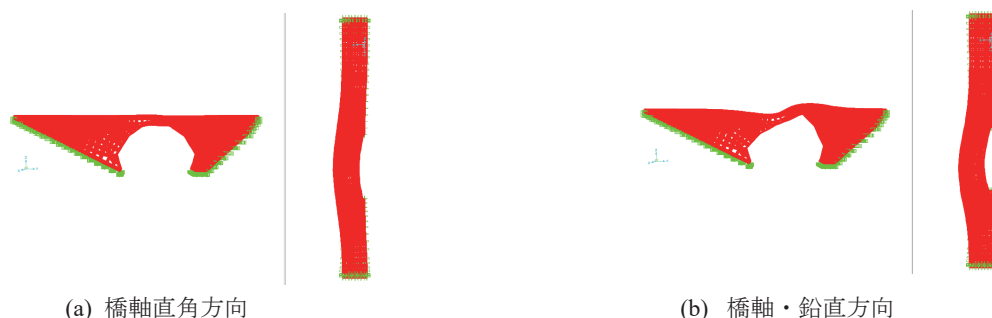


図10 最大変位を示したときの変形の様子

表4 絶対最大変位を示したときの変位量と時間

	節点	時間(sec)	絶対最大変位(cm)
橋軸直角方向	11	8.92	6.47
橋軸方向	17	10.13	2.40
鉛直方向	14	10.13	3.70

### (3) 応力分布図

それぞれの解析モデルに生じる応力の違いについて検討した。ここでは、本震の地震波を入力して解析をおこない、橋軸直角方向と鉛直方向のせん断応力を比較検討した結果について示す。以下示す応力分布図において、平面図では左側が取入口側、右側が吹上り側であり、断面図においては、右側が五老ヶ滝川上流である。また、各応力図の横に応力の凡例を示すが、単位は全て $\text{kN/m}^2$ とする。

#### a) 水平面内せん断応力 $\tau_{xy}$

通水路が水平にずれる破壊モードとの関連を調べるため、 $\tau_{xy}$ の絶対最大値を示した平面図を図11に、それぞれの平面図から共通して大きな応力が生じている部分の断面図（取入口側から35.25m地点）を図12に示す。図11より平面図上ではせん断応力の生じる範囲は盛土部のヤング率を下げたモデル3やモデル5、盛土部をなくしたモデル4になるにつれて狭くなっている。また図12のモデル1・モデル2より、通水管を考慮しなかった解析モデルに比べ通水管を考慮したモデルは真ん中の通水管に広範囲に $1000\text{kN/m}^2$ ものせん断応力が生じていることがわかる。ゆえに、解析にあたって通水管の影響を無視することはできず、通水管を考慮してモデル化する必要がある。

図11より、盛土部をなくした解析モデルでは平面図上ではせん断応力が他の解析モデルに生じるせん断応力の1/2以下であり、図12のモデル4の断面図から、通水管下部の石材には $1000\text{kN/m}^2$ 強の応力が生じているが、通水管には $1000\text{kN/m}^2$ 以上の応力は生じていない。一方モデル3やモデル5のような盛土部のヤング率を下げたモデルでは $1000\text{kN/m}^2$ 以上のせん断応力が生じる範囲が小さくなっていることがわかる。通潤橋に使われている漆喰のせん断強度は不明だが、参考までに京都疏水路閣の目地漆喰のせん断強度試験<sup>5)</sup>では、



113~219kN/m<sup>2</sup>という結果が得られており、本解析で得られた最大せん断応力はその約5倍である。

#### b) 鉛直面内せん断応力 $\tau_{yz}$

通水路が鉛直にずれる破壊モードとの関連を調べるため、 $\tau_{yz}$ の絶対最大値を示した平面図を図13に、それぞれの平面図から共通して大きな応力が生じている部分の断面図（取入口側から41.125m地点）を図14に示す。図13より、平面図上では応力の分布に大きな差はなく、どの解析モデルも主にアーチ中央部に比較的大きな応力が生じている。断面図において、モデル1とモデル2から通水管があることにより応力分布図が異なり、通水管があるモデル1の方が通水管周辺部に大きな応力が生じている。

通水管間の盛土部のヤング率を下げたモデル3とモデル5では、通水管間の盛土部全体のヤング率を下げるより、通水管下部を石材で固め、その上に盛土をした方が通水管周辺に生じる応力が小さくなっていることが分かる。一方、通水管周辺の橋軸直角方向の生じるせん断応力が最も小さかったモデル4は、鉛直方向せん断応力では最も大きなせん断応力が生じていることが確認できた。

平成28熊本地震で通潤橋は崩れることはなく通水管からの水漏れ、縁石のずれであったため、通水管周辺部に生じるせん断応力を重点的に考えると、通水管下部を石材で固め、その上に盛土をしたモデル3が最も

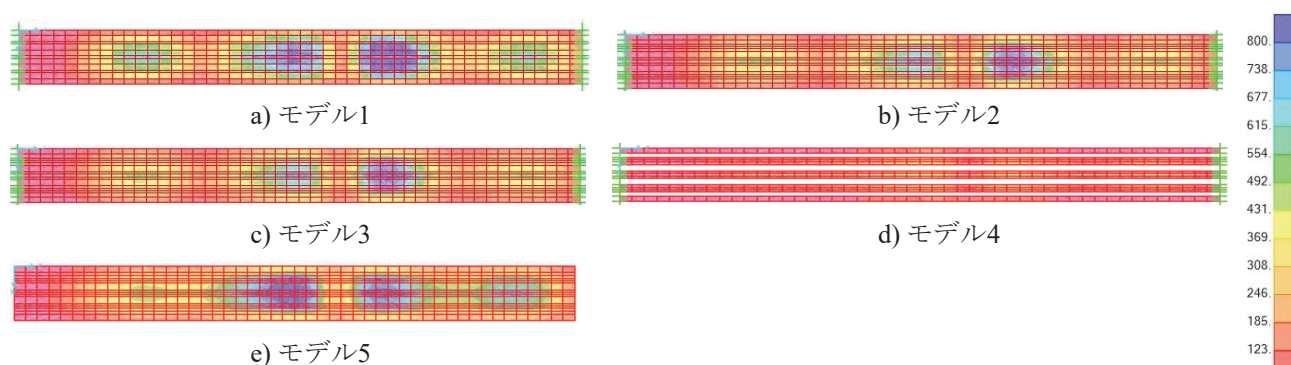


図11 せん断応力  $\tau_{xy}$  応力分布図（平面図）

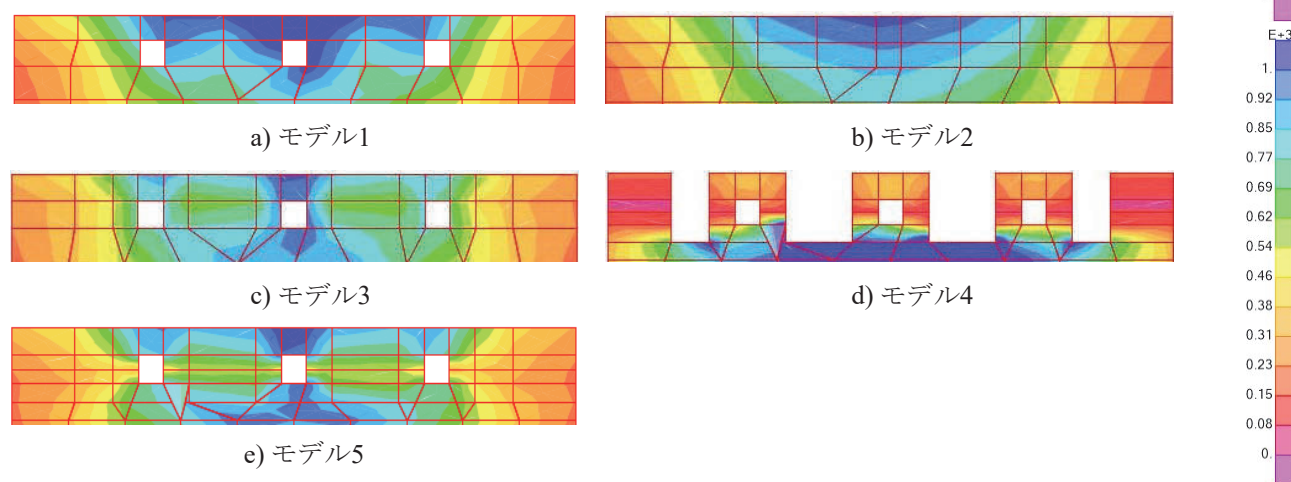


図12 せん断応力  $\tau_{xy}$  応力分布図（断面図）

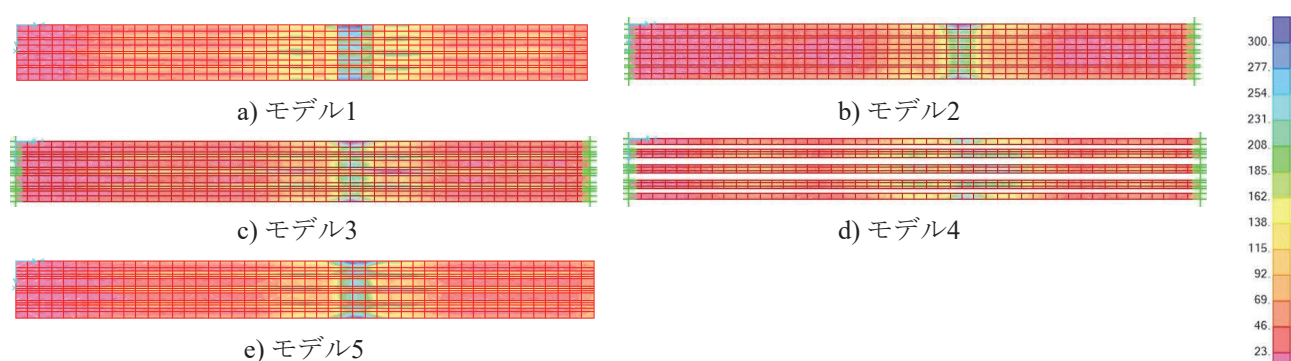


図13 せん断応力  $\tau_{yz}$  応力分布図（平面図）

良いモデルであると考えられる。これは、通水管下部を固い部材で固定して、柔らかい部材で包むことで生じるせん断応力を軽減できたと考えられる。

### c) 橋軸直角方向直応力 $\sigma_{xx}$

縁石が孕み出す破壊モードとの関連を調べるため、 $\sigma_{xx}$ の包絡値を示した平面図を図15に、それぞれの平面図から共通して大きな応力が生じている部分の断面図（取入口側から41.125m地点）を図16に示す。図15では、慣性力の影響により自由端である橋の側面でも応力が生じるような図になっているが、これは使用した要素の大きさが原因である。図15の平面図より、どのモデルもアーチ中央部に比較的大きな応力が生じている。また断面図では、通水管の有無で応力分布図に大きな差はなく、通水管間の盛土部のヤング率を下げる、もしくは無くすことにより通水管上部に生じる直応力が大きくなるのが分かる。

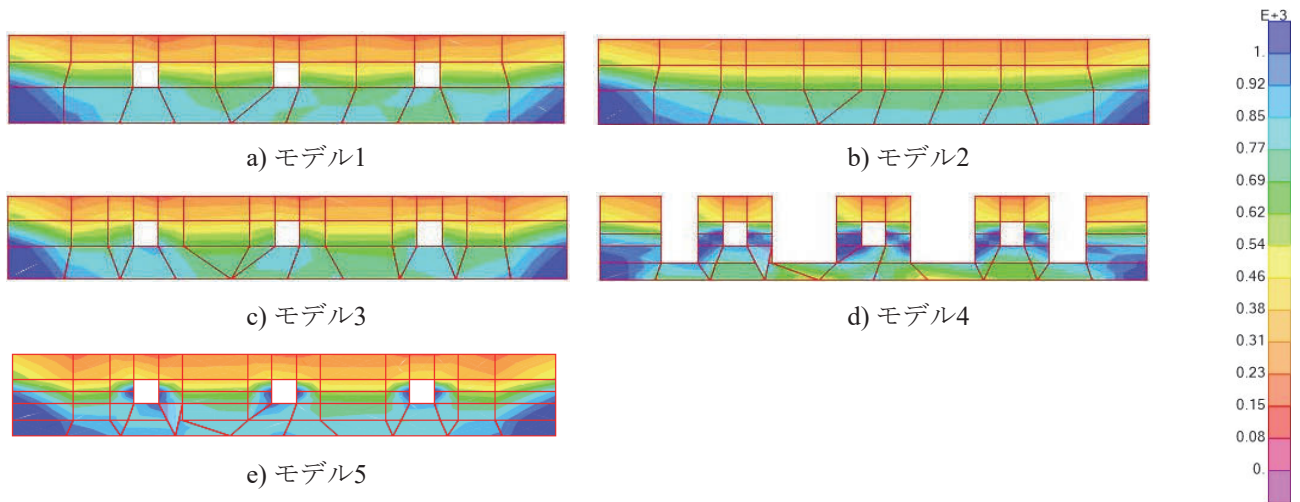


図14 せん断応力  $\tau_{yz}$  応力分布図（断面図）

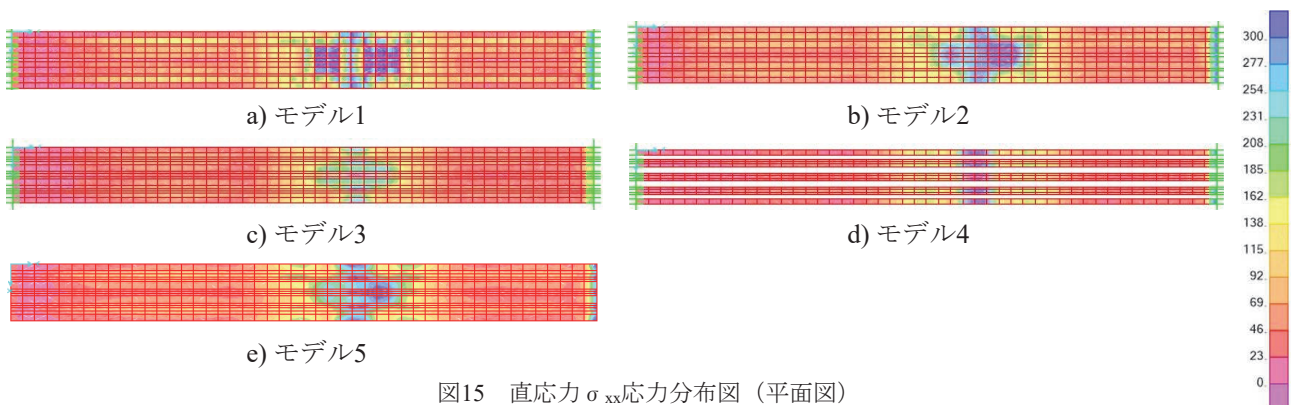


図15 直応力  $\sigma_{xx}$  応力分布図（平面図）

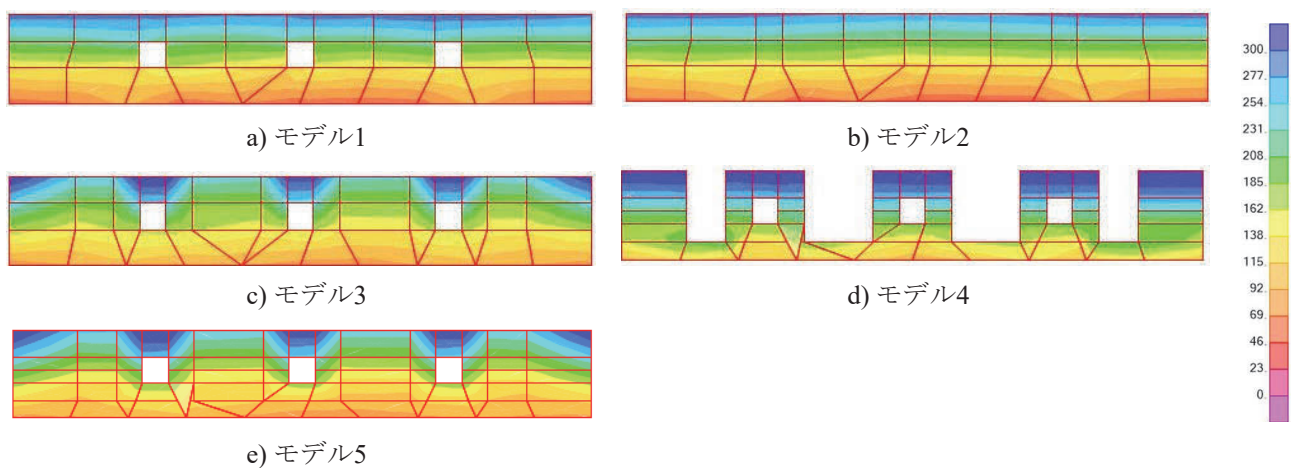


図16 直応力  $\sigma_{xx}$  応力分布図（断面図）

#### (4) 補強に関する検討

以上、代表的な3つの応力成分について結果を示した。現実の破壊挙動は各応力の組み合わせによる影響が考えられるが、通水管のずれや縁石の孕みだしといった代表的な現象について、以上の3つの応力成分の応答結果から、補強について考察を行うこととした。

解析結果より、5つのモデルの中では、盛土を少なくして石材を追加したモデル3が、全般的に地震応答による応力が小さいことがわかった。平成28熊本地震で通潤橋は崩れることはなく通水管からの水漏れ、縁石のずれであったため、通水管周辺部に生じるせん断応力を重点的に考えると、通水管下部を固め、その上に盛土をすることで被害を抑えられると期待できる。通水管下部を固い部材で固定して、柔らかい部材で包むことで、生じるせん断応力を軽減できると考えられる。また、この工法であれば、通潤橋の文化的価値を損なうことはないものと考えられる。今後、より効果的な補強について、モデル3を基に検討していけばよいと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、通潤橋の振動特性の調査結果をもとに、構造解析ソフトを用いて通潤橋をモデル化することにより、平成28年熊本地震に対する通潤橋の地震挙動を確認することができた。また、通水管周辺部の盛土部の部材特性を変化させることにより、通水管周辺部に生じるせん断応力を変化させられることが確認できた。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 通潤橋の解析モデルで固有値解析を行った結果、橋軸直角方向では面外1次振動、橋軸方向ではたわみ2次振動が卓越振動モードであり、鉛直方向では複数の卓越モードが存在していることが考えられる。
- 2) 通潤橋上部の最大変位を確認したところ、橋軸直角・橋軸・鉛直方向それぞれの最大変位を示す地点は異なり、最大で橋軸直角方向では6.5cm、橋軸方向では2.4cm、鉛直方向では3.7cmの変位が生じたと考えられる。
- 3) 通潤橋上部に生じる応力分布図を確認した結果、せん断応力  $\tau_{xy}$ ・ $\tau_{yz}$ 、直応力  $\sigma_{xx}$  が比較的大きな応力が生じる場所はアーチ中央部周辺であることが確認できた。また、代表的な断面に生じる応力を確認した結果、せん断応力  $\tau_{xy}$  では盛土部をなくしたモデル、せん断応力  $\tau_{yz}$  では通水管下部を固め、その上に盛土をしたモデル、直応力  $\sigma_{xx}$  ではすべて同じ要素で作成したモデルが最も通水管周辺部に生じる応力が小さくなることが確認できた。

謝辞：本研究の実施にあたり、熊本県山都町教育委員会の方々にお世話になった。地震応答解析には、防災科学研究所K-NETの記録を利用した。記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 熊本県山都町：重要文化財 通潤橋 保存活用計画，2015.
- 2) Computers and Structures, Inc.:SAP2000, v.18, 2016.
- 3) 伊津野和行・石田優子・藤本将光・深川良一：通潤橋の地震応答に関する研究，土木学会論文集，Vol.73, No4, A1S-0636, 2017（登載決定）
- 4) 国立研究開発法人 防災科学技術研究所：強震観測網K-NET <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 5) 京都市上下水道局：水路閣改修調査検討委員会第1回資料，2010 <http://www.city.kyoto.lg.jp/suido/page/0000078845.html>